

Повышение износостойкости зубьев зубчатых колес циклической закалкой с индукционным нагреванием

А. А. Юсупов, С.Р.Икромалиев, Ё.Д.Ахмаджонов

*Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент,
Узбекистан*

Выполнены исследования по циклической термической обработки стальных образцов на разных температурных режимах для повышения их абразивной износостойкости. Установлено, что циклическое нагревание деталей из стали 65Г до температуры 450 °С повышает их износостойкость на 40 % в сравнении с традиционной индукционной закалкой.

Ключевые слова: *абразивное изнашивание, термическая обработка, циклические нагревания, индукционная закалка, плотность дислокаций, твердость, малолегированная сталь.*

Предприятия сельскохозяйственного машиностроения Республики Узбекистан постоянно увеличивают выпуск хлопкоуборочных машин. При эксплуатации данной техники в результате абразивного изнашивания выходит из строя таких деталей как зубчатые колеса и вал-шестерни, в результате чего ежегодно расходуется большое количество металла для изготовления запасных частей. С каждым годом машиностроительная техника становится более сложной, и для обеспечения ее эффективного использования необходима мощная ремонтная база.

Работоспособность зубчатых колеса во многом определяет долговечность их зубьев. Зубчатые колеса, как правило, изготавливают из низкоуглеродистой стали (содержание углерода $0,1 \div 0,25$ %) и подвергаю их термической обработке – цементация, закалка и низкий отпуск. Сокращение времени обработки обеспечивает цементация в газовой среде. При этом расходуется много электроэнергии и газообразного углеводорода.

В последующие годы исследователями были предложены разные варианты термической обработки зубчатых колес, включая многократные нагревания и охлаждения в основном выше точки фазового превращения. Такую обработку назвали термоциклической обработкой. Ее используют для измельчения зерна и снятия внутренних напряжений, что обеспечивает повышение прочности и вязкости стали.

Износостойкость сталей, как правило, во многом зависит от твердости и плотности дислокаций в объеме материала.

Было установлено, что есть возможность дополнительного повышения износостойкости сталей использованием нестандартных режимов термообработки, которая заключается в создании благоприятных сочетаний структурных параметров материала при уже достигнутой для них

максимальной твердости. По данным работы [1] циклической закалкой можно существенно изменить плотность дислокаций в материале, что будет способствовать повышению износостойкости и изменению других показателей его механических свойств.

Эксперименты показали, что после трех циклов термообработки образцов изменилась микроструктура стали, появились микроскопические кластеры и субмикроскопические сфероиды цементита в матрице мартенсита [2].

Настоящая работа направлена на повышение абразивной стойкости сталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, путем циклической закалки с индукционным нагреванием токами высокой частоты, т. е. многократными нагреваниями и охлаждениями стали с целью формирования новой структуры для повышения механических свойств.

В экспериментах использовали образцы из стали 65Г, химический состав которой приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химические составы исследуемой стали 65Г и контрольной 18ХГТ

Сталь	Химический элемент, % мас.						
	С	Si	Mn	Cr	Ti	S	P
65Г	0,68	0,25	1,15	–	–	0,03	0,03
18ХГТ (контрольный образец)	0,31	0,29	1,00	0,98	0,1	0,02	0,02

Образцы с размерами 20×20×7 мм обрабатывали, используя разные термические режимы. Контрольным являлся образец, прошедший традиционное индукционное нагревание до температуры 900 °С, охлаждение в масле и отпуск при температуре 180 °С [3]. Исследуемые образцы нагревали до температур $T = 450, 570$ и 700 °С; наибольшее число циклов достигало 7. Температуру нагревания выбирали, исходя из существующих режимов термоциклической обработки. После каждого нагревания выполняли охлаждение на воздухе под вытяжкой (традиционный способ охлаждения на промышленных предприятиях). После последнего нагревания до температуры 950 °С образец закаляли в масле и осуществляли отпуск при температуре 180 °С. Для регистрации структурных изменений при обработке часть образцов не проходили окончательную закалку и отпуск. Для термической обработки использовали современную установку ВЧГ2-100/066 для индукционного нагревания.

Для равномерного прогревания образцов изменение температуры составляло 110÷120 °С/с. Для оценки температурно-временного фактора при циклической закалке к образцу припаивали термopару, подсоединенную к быстродействующему потенциометру для регистрации температуры.

Для сравнения производственных данных на АО «Агрегатный завод» выбранные образцы из стали 18ХГТ (см. табл. 1) подвергали цементации в шахтных печах вместе с садкой из зубчатых колес. Цементацию зубьев зубчатых колес выполняли при температуре $T = 900\div950$ °С в течение 8÷10 ч.

Испытания на изнашивание выполняли трением скольжения по незакрепленному абразивному материалу на установке ПВ-7 [4]. Абразивным материалом являлся пылевидный кварцевый песок, который подавали порциями с помощью дозатора на поверхность образца и полиуретанового шнека. Выбор установки и способа испытания на абразивное изнашивание был обусловлен предыдущими исследованиями, которые показали, что испытания на износостойкость на машине ПВ-7 близки к изнашиванию в полевых условиях уплотнителя сошника хлопковой сеялки на полях Узбекистана – совпадали расположения материалов и значения относительной износостойкости [5]. Последнее определяли сравнением потерь массы (масса Q износа) контрольного образца, который взвешивали до и после испытаний на аналитических весах ВЛА-200М (точность до 0,1 мг); повторяемость опытов составила 5.

Для исследования структуры использовали металлографический и рентгеноструктурный анализы. Металлографические исследования проводили на микроскопе МИМ8-М (кратность увеличения 100÷1000). Травление шлифов выполняли 3 %-ым раствором HNO_3 в этиловом спирте. Травление границ аустенитных зерен на закаленной стали выполняли в насыщенном водном растворе пикриновой кислоты с добавлением моющих веществ [6].

Рентгеноструктурные исследования осуществляли на установке ДРОН-2,0. Определяли физическую ширину β_{cp} рентгеновской линии (220), которую приняли в качестве меры несовершенства кристаллической решетки. По физическому уширению рентгеновских интерференций рассчитывали плотность дислокаций [7].

Таблица 2

Изменение показателей свойств стали 65Г после циклирования с последующим охлаждением на воздухе

Нагревание до температуры, °С	Число циклов	<i>HV</i>	β_{cp} , 10^{-3} рад
450	1	269	9,87
	2	269	9,87
	3	269	9,87
	4	269	9,87
	5	269	9,87
550	1	241	9,1
	2	241	9,1
	3	241	9,1
	4	241	9,1
	5	241	9,1
700	1	229	9,88
	2	229	9,88
	3	229	9,88
	4	229	9,88
	5	229	9,88

Циклическое нагревание образцов из стали 65Г с последующим охлаждением на воздухе способствовало сфероидизации исходной пластинчатой структуры стали. Особенно четко это наблюдалось при нагревании стали до температур 450, 570 и 700 °С (табл. 2).

Дефектность кристаллического строения стали 65Г после циклической обработки в интервале докритических температур мало зависит от температуры T и числа N циклов. Только нагревание выше критической температуры (A_{c1}) с последующим охлаждением на воздухе позволило сформировать менее равновесную структуру и повышенную кристаллическую дефектность.

Несколько иные результаты имели место при окончательной индукционной закалке и низком отпуске. При разных вариантах термической обработки образцы имели одинаковую микроструктуру, величину зёрен и твердость (600÷620 HV), отличались они степенью кристаллической дефектности. Положительный эффект наблюдается при 2–5 циклах нагревания образцов до температуры 450 °С (рис. 1). При температурах 550 и 700 °С кристаллическая дефектность или ниже, или этот эффект не стабилен. Это можно объяснить микропластической деформацией в результате значительных температурных перепадов. Наличие второй фазы также способствует микропластической деформации из-за разницы термического расширения фаз.

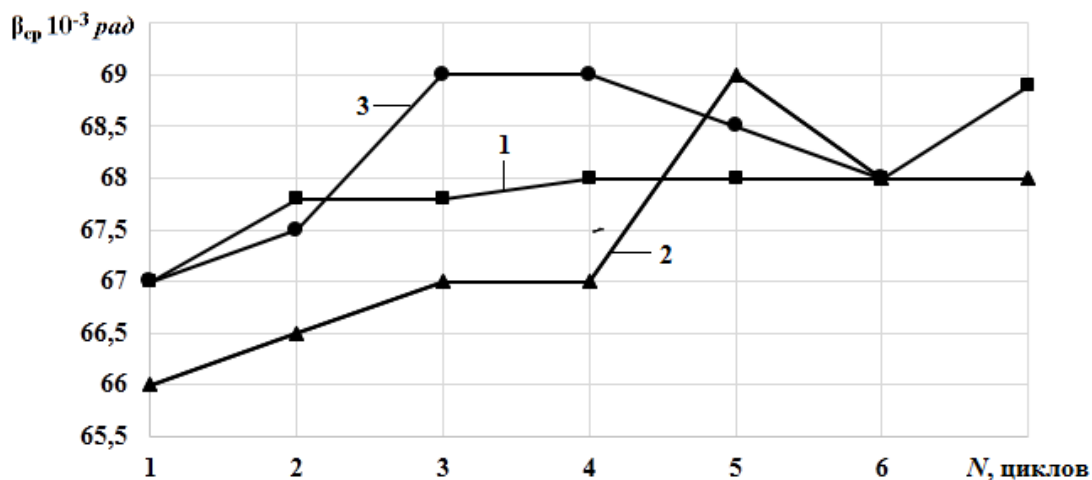


Рисунок 1 – Зависимости изменения физической ширины $\beta_{ср}$ рентгеновской линии от числа N термических циклов и температуры нагревания $T = 450$ (1); 570 (2); 700 (3) °С

Таким образом, развивается дислокационная структура, а повышенная температура способствует ее полигонизации, при этом высокая кристаллическая дефектность не наблюдается, однако имеет место высокая термическая стабильность. При повторном нагревании выше точки фазового превращения полигонизованные структуры обеспечивают появление структур с высокой плотностью дислокаций.

Циклическая обработка при температурах более 450 °С приводит к интенсивной рекристаллизации, полигональные структуры не образуются. Однако индукционная закалка после предварительной циклической обработки при температуре 450 °С не дает существенного повышения плотности дислокаций по сравнению с традиционной индукционной закалкой. При одной твердости разница физической ширины рентгеновской линии достигает $\beta_{cp} = 5 \cdot 10^{-3}$ рад (см. рис. 1).

Результаты испытаний на изнашивание согласуются с данными микро- и субмикроисследований образцов. Это же показали и испытания на абразивное изнашивание при незакрепленном абразивном материале (рис. 2).

Циклическая термическая обработка стали 65Г создает структуру с более высокой плотностью кристаллических дефектов. Оптимальным режимом обработки следует считать режим с предварительным циклическим нагреванием до температуры 450 °С.

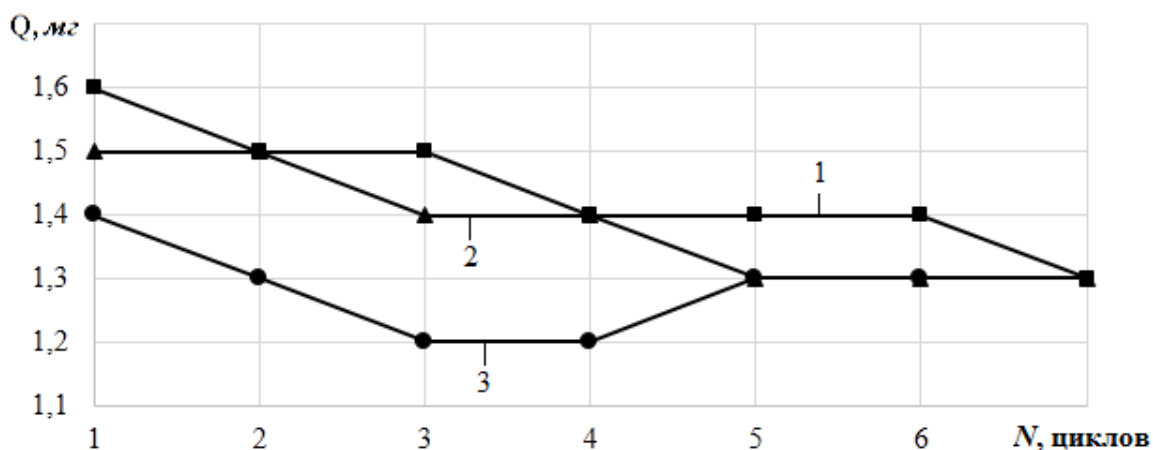


Рисунок 2 – Зависимости изменения массы Q абразивного износа образцов из стали 65Г от числа N термических циклов и температуры нагревания $T = 450$ (1); 570 (2); 700 (3) °С

Микроструктурный анализ показал, что все образцы имели мартенситную структуру (в стали 18ХГТ в сердцевине наблюдались участки нижнего бейнита). При высокой твердости материала для сохранения необходимой вязкости требуется мелкое аустенитное зерно, наличие которого определяли травлением (ГОСТ 5639–65).

Контрольный образец из стали 18ХГТ имел аустенитные зерна со средним диаметром $d_{cp} = 0,02736 \div 0,03315$ мм (7, 8 баллов). Сталь 65Г после оптимального режима циклической закалки имела $d_{cp} = 0,055$ мм (5, 6 баллов), а вершина зуба – $d_{cp} = 0,0927 \div 0,0729$ мм (4, 5 баллов), что соответствует началу перегрева.

Микроанализ и определение твердости показали, что наибольшие твердость и плотность дислокаций имеют образцы из стали 65Г, прошедшие оптимальную циклическую закалку (табл. 3).

В настоящее время на АО «Агрегатный завод» и кафедрой «Обработка металлов давлением» Механического факультета Ташкентского ГТУ им. Ислама Каримова продолжаются научно-исследовательские работы в этом направлении.

Таблица 3

Результаты термической обработки стали 65Г

Сталь	Обработка	<i>HV</i>	<i>Q</i> , мг	$\beta_{\text{ср}}$, 10^{-3} рад
65Г	Индукционная закалка	578÷600	2,14	63,2
	Индукционная закалка на оптимальном режиме	600÷620	1,20	69,0
18ХГТ	Цементация, закалка	514÷534	1,70	64,4

Циклическая термическая обработка стали 65Г может создать структуру с более высокой плотностью кристаллических дефектов. Оптимальным вариантом следует считать режим, включающий в себя предварительное циклирование с нагреванием до температуры 450 °С.

Таким образом, оптимальный режим циклической термической обработки стали 65Г обеспечивает повышение абразивной износостойкости на 30 %, что в 2 раза больше по сравнению с повышением износостойкости образцов из стали 18ХГТ после индукционного нагревания до температуры 900 °С. Это позволяет существенно экономить электроэнергию и газообразный углеводород.

Библиографический список

1. Евдокимов А. И., Зелин М. Г., Коротков В. А. Циклическая закалка стали ХВГ // МиТОМ, 2002. № 9. С. 33–34.
2. Alok Mishra, Joydeep Maity. Structure-property correlation of AISI 1080 steel subjected to cyclic quenching treatment // Materials Science and Engineering: A. Volume 646, 14 October 2015, Pages 169–181.
3. Бердиев Д. М. Повышение абразивной износостойкости сталей // Техника и технологии машиностроения // VI Междунар. конф. Омск. 2017. С. 3–8.
4. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976. 267 с.
5. Berdiev D., Yusupov A., Umarova M. and Ibodullaev T. 2020. Improving Wear Resistance of Steel Products to Unconventional Heat Treatment Methods. // *International Journal of Scientific and Technology Research* 9 (2): 2504–9.
6. Батаев В. А., Батаев А. А., Алхимов А. П. Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей. М.: Наука, 2007. 224 с.

7. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ М.: МИСИС, 1994. 328 с.